

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

アドバンスド・コージェネレーションシステム
におけるボトミングステージの
最適運用計画に関する研究

Study on Optimal Operational Planning of the
Bottoming Stage in Advanced Cogeneration
System

申 請 者

富澤	昌雄
Masao	Tomizawa

機械工学専攻 制御工学研究

2006年2月

近年、エネルギー需要の増加に伴い、資源枯渇や地球温暖化など、地球規模の問題が浮上し、具体的な対策が急務となっている。その一つの解決策として、コージェネレーションシステムが注目されており、特にアンモニアなどの自然系冷媒を作動流体に用いたコージェネレーションシステムが提案されている。一般に、熱電併給を使命とするコージェネレーションシステムには、両者への円滑なエネルギー供給と負荷への柔軟な対応が求められる。しかしながら、特に冷熱需要については季節・時刻によって大きく変化し、現状の多くのシステムでは設計時の利用効率を達成していない場合が見られる。

このような状況を背景に、アドバンスド・コージェネレーションシステム（ACGS）を構築した。ACGS は、トッピングステージにガスタービンと排熱回収ボイラ、ミドルステージに水蒸気タービン、ボトムリングステージにアンモニア・水混合媒体タービンシステム（AWMT）、アンモニア吸収式冷凍システム（AAR）、氷蓄熱システムの各システムを配置し、これら 3 つのステージがカスケード的に連結され、熱と電力の発生を柔軟に行える点が特徴として挙げられる。本論文では、具体的な需要家を想定し需要パターンが与えられた際に、ACGS をベースとするコージェネレーションシステム導入に資するシステム構成の最適化および最適運転計画手法を提案している。

本論文は 7 章より構成されている。第 1 章は序論で、本論文の目的と研究の背景、関連する従来の研究について述べている。第 2 章では、ACGS を構成する各機器の役割と特徴について述べている。第 3 章では、各機器の入出力モデル化の方法を提案し、最適化問題としての定式化について論じている。第 4 章では、代表的な需要家における電力および冷熱需要パターンの要因分析について論じている。第 5 章では、氷蓄熱槽を含む ACGS のボトムリングステージの効率的な運用方法について、第 6 章では、電力および冷熱需要に対するシステム全体の機器選定および最適運用計画の導出について論じている。第 7 章は結論である。

まず第 2 章では、ACGS は 3 つのステージがカスケード的に連結したシステムであることを説明している。特に、ボトムリングステージは、発電サイクルと冷凍サイクルの組み合わせにより、熱電併給に柔軟性があること、氷蓄熱槽を付帯することで、柔軟な運用を期待できる構成であることを説明し、本ボトムリングステージに焦点を当て、発電出力最大化の観点から線形計画法を用いる方針を述べている。

第 3 章では、本研究の目的であるシステムの最適設計および最適運用計画の導出のために、最適化問題としての定式化について提案を行っている。ACGS の各機器は、その出力特性において非線形性を持っている。例えば、AAR においては部分負荷時に COP が最大となる動作点を持ち、また氷蓄熱槽においては、蓄熱能力や放熱能力が蓄熱量に依存している。これらの非線形性をそのままモデル化することも可能であるが、最適運用計画問題が複雑化するとともに、求められた解の大域的最適性の保証が得られないなど、不

都合な点も多い．したがって，本論文では，0－1変数を用いた線形関数の結合により各機器の特性をモデル化し，機器の特性を表現しながら，最適運用計画問題を複雑化せずに定式化する手法を提案している．

次に，第4章においては，分析の対象とする需要家について，ホテル，病院，事務所に代表される業務部門を選定している．関連する従来の研究においては，戸建住宅や集合住宅におけるエネルギー需要の分析や予測手法の開発は行われているものの，ホテルや病院のように電力需要と冷熱需要を持ち，季節によってその量が変化する需要家を対象にしたものは非常に少ない．そこで，本論文ではこれらの需要家について具体的な需要パターンを算出することを目的に，まず需要分析を行っている．需要パターンに影響を与える要因を特定する上で，定性的要因と定量的要因とに分けて分析を行っている．定性的要因の分析においては，季節，曜日，時刻に着目し，冷熱需要および電力需要ともに，季節および時刻が相関を持つことを明らかにしている．一方，定量的要因の分析においては，最高気温，平均気圧，平均風速に着目し，冷熱需要および電力需要ともに，最高気温と相関を持つことを明らかにしている．この結果に基づき，季節ごとの最高気温を用いて，一日の時間帯端点の需要を回帰直線により算出し，一日の需要パターンを再現するモデルを構築している．これによって，対象とする需要家の種類と季節の最高気温を与えれば，一日の冷熱需要および電力需要パターンを簡易に評価することが可能としている．

第5章では，ACGS ボトミングステージの運用の柔軟性について論じている．具体的には，ボトミングステージに配置される氷蓄熱システムを有効利用することにより，冷熱需要を満たしつつ，発電および冷熱発生が効率的に行われることを示している．システムに供給される水蒸気流量が一定であるとの条件の下，システムに氷蓄熱槽がある場合とない場合とにおいて，想定した冷熱需要に対するAARの最適な定格出力選定および運用計画を比較検討している．その結果，氷蓄熱槽がある場合は，1) AARは効率のよい出力点で一定運転が可能のため，水蒸気消費効率が向上する，2) AARの効率が向上することにより，AWMTへの水蒸気供給量が増加し，総発電量が増加する，3) 効率のよい一定運転が可能であることから，AARの定格出力を小さくすることができることを明らかにしている．したがって，ボトミングステージに氷蓄熱槽を配置することにより，システムの利用効率が向上し，需要に対して柔軟な運転が可能となることを明らかにしている．

最後に，第6章では，冷熱需要及び電力需要が与えられた際，ACGSをベースとするコージェネレーションシステムの最適な構成機器選定および運用計画について論じている．検討するシステムは，ガスタービン2機，AAR，AWMT，氷蓄熱槽を主な構成機器とし，さらにバックアップ用冷凍機として電気式ヒートポンプまたはガスヒートポンプを使用できるものとしている．年間の運用コストを検討する代表日として最低需要日，最高需要日，最頻需

要日を想定し、これらの需要を満たし、年間の運用コストが最小となるような構成機器の定格出力を検討している．例えば、あるホテルに対する算出結果では、1) 各機器の定格出力は、800 kW および 1200 kW のガスタービン、400 kW の AWMT、400 kW の電力契約、2100 kW の AAR、1500 kW のガスヒートポンプが最適である、2) 電力需要に対する運転として、最低需要日には、800 kW のガスタービンを定格出力運転し、日中のみ 1200 kW のガスタービンを起動する．最高需要日には、2 台のガスタービンを入れ替えた運転を行うことにより、高効率の運用を行う、3) 冷熱需要に対しては、AAR は夜間には冷熱需要を超える出力で運転し、余剰冷熱を氷蓄熱し、日中に放熱する、4) 年間運用コストについては、電力購入と電気ヒートポンプから構成されるシステムと比較したところ、約 30 % の削減となることを明らかにしている．これらの結果から、ACGS をベースとするコージェネレーションシステムの導入に際し、年間の運用コストが最小となるシステム構成および運用計画の算出を行う手法を確立している．

第 7 章は、結論であり、本研究で得られた成果を要約している．

本論文の成果を総括すると、ACGS の各構成機器について実験データに基づき 0 - 1 変数を用いて線形関数の結合でモデル化を行うとともに、運用コスト最小化問題として定式化を行っている．一方、典型的な需要家の需要パターンを算出するために、最高気温との関係を明らかにし、そのモデルを構築している．そして、上記 2 つのモデルを用いて、ボトムングステージにおける氷蓄熱槽の役割とその効果を、具体的な需要家例として事務所、ホテル、病院などに対して評価し、その有効性を確認している．すなわち典型的な需要家を対象に、電力需要および冷熱需要に対するシステム構成機器の最適選定と最適運用計画の手法を明らかにしている．

以上要するに、本論文は ACGS をベースとするコージェネレーションシステムの導入を検討する際の最適設計の手法を提示し、その手法および具体的なケーススタディの成果は、コージェネレーションシステムの最適運用計画に関する研究において従来にない新たな局面を展開するもので、より一層の省エネルギーの促進、コージェネレーションシステムの運用と展開に資するものであり、また応用数理計画に対して工学的に大きく貢献をするものである．よって、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める．

2006 年 2 月

審査員（主査）	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	橋詰 匠
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	河合素直
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	山川 宏
	早稲田大学助教授	工学博士（早稲田大学）	武藤 寛
	早稲田大学助教授	博士（工学）（早稲田大学）	天野嘉春